

Научная статья

ББК 74.262.23

УДК 372.853

И. В. Гребенев, П. В. Казарин
НЕБОЛЬШОЕ УПРАЖНЕНИЕ НА ТЕМУ
«ЭКСПЕРИМЕНТИРУЮЩЕЕ МЫШЛЕНИЕ
ПРЕПОДАВАТЕЛЯ ФИЗИКИ»

Описана последовательность методической деятельности преподавателя по трансформации известного эксперимента из курса физики основной школы в способ экспериментальной проверки сложной теоремы курса электродинамики.

Ключевые слова: экспериментирующее мышление, физический эксперимент, электродинамика, теорема взаимности.

I. V. Grebenev, P. V. Kazarin
A SHORT EXERCISE ON THE TOPIC
«EXPERIMENTAL THINKING
OF A PHYSICS TEACHER»

The sequence of the teacher's methodical activity on the transformation of a well-known experiment from the course of physics of the secondary school into a method of experimental verification of a complex theorem of the course of electrodynamics is describe.

Keywords: experimental thinking, physical experiment, electrodynamics, reciprocity theorem.

Экспериментирующее мышление преподавателя физики позволяет раздвинуть горизонты его деятельности, расширяет условия и результаты применения известных ему экспериментов, стандартных приемов, методик. Выходя на уровень экспериментирующего мышления, педагог проходит через создание (проектирование, изобретение) новой методической реальности,

в том числе в виде новой экспериментальной установки для решения новой методической задачи. Выдвинутая методическая гипотеза предполагает построение новой, не существовавшей до этого модели изучаемого явления [1, 2, 3].

В качестве расширения концепции экспериментирующего мышления нами выдвинуто такое утверждение: *если для решения актуальной методической задачи требуется учебный эксперимент, недостаточно разработанный, или полностью отсутствующий в доступной методической среде, то квалифицированный преподаватель самостоятельно разрабатывает, реализует и верифицирует экспериментальную установку вместе с методикой ее применения* [4, 5].

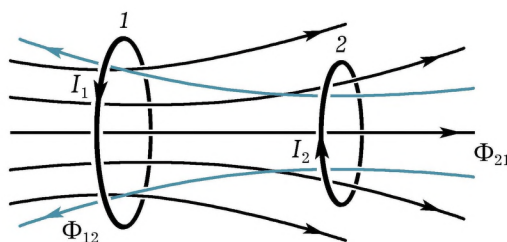


Рис. 1. К теореме взаимности

Рассмотрим в качестве примера так называемую *теорему взаимности*, важное, довольно сложно доказываемое утверждение, которое в силу своей сложности часто лишь декларируется в курсах общей физики, но с характерной ссылкой: «Соответствующий расчет дает (и опыт его подтверждает), что при отсутствии ферромагнетиков коэффициенты L_{12} и L_{21} одинаковы» [6, с. 219]. Из этой фразы следует, что нужен либо расчет, либо доказательный (по В. В. Майеру [7]) эксперимент. Иначе уровень достоверности получаемого нового знания не отвечает статусу физики, как науки и учебного предмета, не допускающего не верифицируемого содержания. Однако эксперимента по доказательству или иллюстрации справедливости теоремы взаимности в курсе общей физики мы не нашли, за исключением описания работы трансформатора.

Напомним коротко физическую основу явления. Если два проводника с токами I_1 и I_2 (рис. 1) расположены близко друг от друга, то некая часть Φ_{21} магнитного потока Φ_1 , созданного током I_1 в катушке 1, пересекает контур второго проводника: $\Phi_{21} = L_{21}I_1$, где L_{21} — коэффициент взаимной индукции проводников 1 и 2. И наоборот, часть магнитного потока Φ_2 , созданного

током I_2 в катушке 2, пересекает контур первого проводника: $\Phi_{12} = L_{12}I_2$. В этом случае изменение тока dI_1 в катушке 1 за время dt вызывает ЭДС взаимной индукции в проводнике 2:

$$\mathcal{E}_{i2} = -\frac{d\Phi_{21}}{dt} = -L_{21}\frac{dI_1}{dt},$$

и наоборот

$$\mathcal{E}_{i1} = -\frac{d\Phi_{12}}{dt} = -L_{12}\frac{dI_2}{dt}.$$

Коэффициенты взаимной индукции L_{12} и L_{21} определяются как геометрией каждого проводника, так и их взаимным расположением. Теорема взаимности утверждает, что коэффициенты L_{12} и L_{21} одинаковы:

$$L_{12} = L_{21}.$$

В качестве экспериментальной основы для проверки теоремы взаимности проще всего взять готовый прибор по обнаружению и исследованию явления электромагнитной индукции (рис. 2), в котором будем менять подключение катушек то к источнику, то к гальванометру. Для создания ΔI будем просто включать постоянный источник напряжением U поочередно, то к L_1 — большой катушке, то к малой — L_2 , перенося соответственно провода к гальванометру.

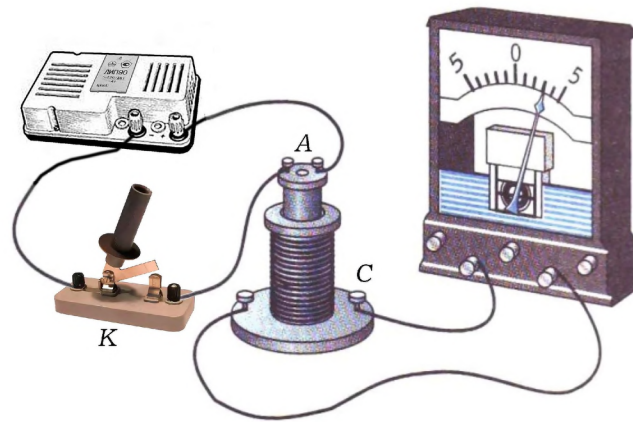


Рис. 2. Основа экспериментальной установки

Проведя первые опыты, мы увидим, что вопреки ожиданиям отклонение стрелки гальванометра при смене местами катушек отличаются в несколько раз (рис. 3)! Жаль!

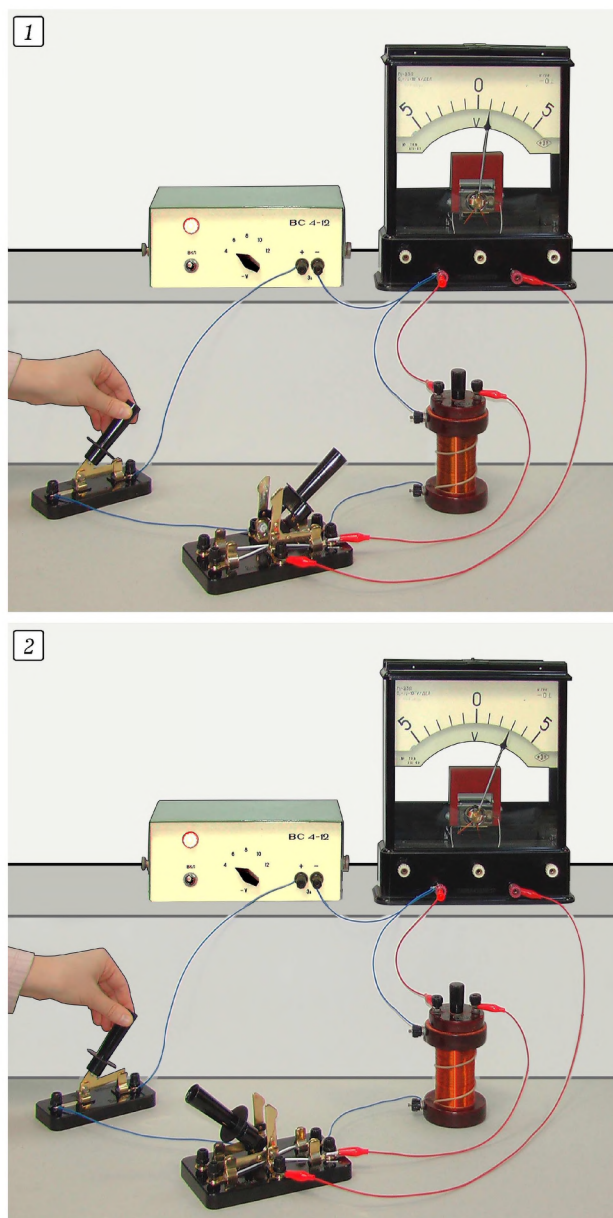


Рис. 3. Первый вариант демонстрационной установки. На переднем плане находится переключатель малой и большой катушек

Обратимся к физической основе явления и создадим модель проектируемых процессов. Ток при замыкании ключа $K1$ (рис. 4) возрастает по экспоненциальному закону:

$$I(t) = \frac{U}{r} \left(1 - e^{-rt/L} \right),$$

достигая достаточно быстро, вследствие малой индуктивности катушек, значения U/r , которое и можно принять за ΔI при соответствующем значении r . Но очевидно, что сопротивления катушек разные, поэтому их надо выровнять добавлением к малой катушке соответствующего балластного сопротивления R , чтобы удовлетворять условию $\Delta I_1 = \Delta I_2$.

Тогда получим изменение магнитного потока в катушке L_2 :

$$\Delta \Phi_{21} = L_{21} \frac{U}{R_1}.$$

В приведенной схеме осуществляется баллистический режим работы гальванометра, поэтому показание гальванометра N_2 регистрирует величину заряда ΔQ_{21} , протекшего через вторую катушку и гальванометр при изменении тока в первой:

$$N_2 \sim \Delta Q_{21} = \frac{\Delta \Phi_{21}}{R_2} = L_{21} \frac{U}{R_1 R_2}.$$

При подключении источника тока ко второй катушке переключателем $K2$ (рис. 4) заряд, протекший через первую катушку, и показания гальванометра будут выражаться аналогично:

$$N_1 \sim \Delta Q_{12} = \frac{\Delta \Phi_{12}}{R_1} = L_{12} \frac{U}{R_1 R_2}.$$

Получив это выражение, мы с удивлением увидели, что оно совсем не требует равенства сопротивлений катушек для иллюстрации теоремы взаимности, поскольку величины R_1 и R_2 входят в него симметрично!

Однако опыт (рис. 3.1) упрямо утверждает, что это не так! Ответ оказывается банальным, но поучительным. Под R_2 в последней формуле следует понимать все сопротивление измерительной части цепи, включая сопротивление гальванометра, составляющее несколько ом, т. е. правильная форма такая:

$$N_2 \sim \Delta Q_{21} = \frac{\Delta \Phi_{21}}{R_2 + R_g} = L_{21} \frac{U}{R_1 (R_2 + R_g)}.$$

При смене местами катушек:

$$N_1 \sim \Delta Q_{12} = \frac{\Delta \Phi_{12}}{R_1 + R_g} = L_{12} \frac{U}{R_2(R_1 + R_g)}.$$

Справедливость теоремы взаимности будет следовать из равенства отклонений стрелки гальванометра при очевидном условии равенства знаменателей, то есть вновь $R_1 = R_2$.

На рис. 4 приведена принципиальная схема создаваемой установки, результат применения которой иллюстрирует рис. 5. Активное сопротивление малой катушки несколько Ом, большей около 50 Ом, поэтому величина добавочного сопротивления R существенная. Это добавочное сопротивление приводит к тому, что соответственно уменьшается протекший через гальванометр заряд. Чувствительности школьного демонстрационного гальванометра уже не хватает для значительного отклонения стрелки. Приходится заменять демонстрационный гальванометр на зеркальный (рис. 5). Ключ $K1$ замыкает цепь, обеспечивая необходимое изменение силы тока для наблюдения явления взаимной индукции. Переключатель $K2$ подключает катушки в соответствии с этапами эксперимента. К малой катушке $L2$ нетрудно подобрать в качестве добавочного сопротивления R постоянный резистор. Применение вместо него переменного резистора позволяет точно регулировать величину R_2 для достижения максимального эффекта демонстрации.

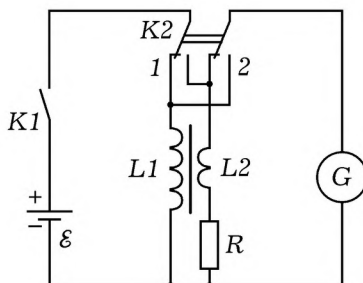


Рис. 4. Принципиальная схема установки для иллюстрации справедливости теоремы взаимности: 1 — положение переключателя $K2$, в котором напряжение подается на катушку $L1$; 2 — в этом положении переключателя $K2$ напряжение подается на катушку $L2$

В итоге удается удовлетворительно показать справедливость теоремы взаимности при использовании доступного школьного оборудования (рис. 5).

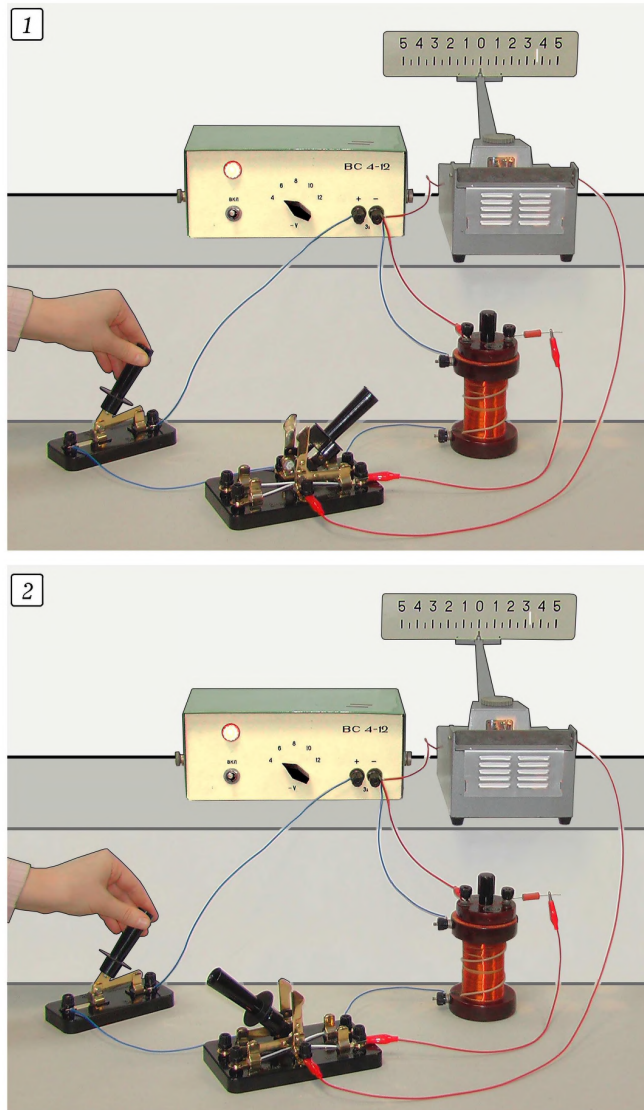


Рис. 5. Подтверждение справедливости теоремы взаимности в демонстрационном эксперименте. На photographиях показан момент замыкания ключа $K1$ (рис. 3). Переключателем $K2$ напряжение подается: 1 — на катушку $L1$; 2 — на катушку $L2$

Таким образом, этот простой пример демонстрирует полный алгоритм проявления экспериментирующего мышления. Есть методическая проблема, для решения которой привлекается соответствующая теория и строится модель исследуемого явления, процесса. При анализе модели возникает гипотеза, определяющая основу предполагаемого нового эксперимента. Для проверки гипотезы проводится первая серия экспериментов, результаты которых дают направление дальнейшего развития эксперимента и методики его применения в учебном процессе.

В нашем случае полный цикл экспериментирующего мышления преподавателя на умышленно простом примере привел к созданию новой демонстрации в вузовском курсе электродинамики.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гребенев И. В. Методическое значение экспериментирующего мышления // Учебная физика. — 2023. — № 1. — С. 45–54.
2. Майер В. В., Сауров Ю. А. Экспериментальное мышление: смыслы, ценности, черты, технология формирования // Учебная физика. — 2018. — № 4. — С. 45–65.
3. Майер В. В., Сауров Ю. А. Экспериментирующее мышление в методике обучения физике // Физика в школе. — 2018. — № 7. — С. 3–11.
4. Полушкина С. В. Учебный эксперимент как средство усвоения физических знаний учащихся // Учебная физика. — 2015. — № 1. — С. 45–49.
5. Гребенев И. В., Полушкина С. В. Методическая эффективность школьного физического эксперимента // Школа будущего. — 2012. — № 3. — С. 14–18.
6. Иродов И. Е. Основные законы электромагнетизма: Учебное пособие для студентов вузов. — М.: Высшая школа, 1991.
7. Майер В. В., Майер Р. В. Электричество: учебные экспериментальные доказательства. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. — 232 с.

Национальный исследовательский
Нижегородский государственный
университет им. Н. И. Лобачевского

Поступила в редакцию 24.01.24.